

UDK 628.29.001.7:621.67

Primljeno 18. 6. 2010.

Kavitacija u centrifugalnim crpkama

Živko Vuković, Ivan Halkijević

Ključne riječi

kavitacija,
centrifugalna crpka,
suha izvedba,
raspoloživa neto pozitivna
usisna visina,
potrebna neto pozitivna
usisna visina

Key words

cavitation,
centrifugal pump,
dry type,
available net positive
suction height,
required net positive
suction height

Mots clés

cavitation,
pompe centrifuge,
type sec,
hauteur d'aspiration nette
positive disponible,
hauteur d'aspiration nette
positive requise

Ключевые слова

кавитация,
центробежный насос,
сухое исполнение,
имеющаяся чистая
позитивная высота
всасывания, необходимая
чистая позитивная
высота всасывания

Schlüsselworte

Kavitation,
Zentrifugalpumpe,
trockene Ausführung,
verfügbare netto positive
Saughöhe,
erforderliche netto
positive Saughöhe

Ž. Vuković, I. Halkijević

Pregledni rad

Kavitacija u centrifugalnim crpkama

Dan je pregled aktualnih znanstvenih istraživanja fenomena kavitacije kod centrifugalnih crpki suhe izvedbe. Kao temeljni parametar pri opisu pojave i razvoja kavitacije rabljena je koncepcija raspoložive i potrebne neto pozitivne usisne visine. Iznese su spoznaje kojima se osigurava beskavitacijski rad crpki, čime se otklanja mogućnost pojavljivanja u praksi značajnih problema pri redovitom pogonu i održavanju. Na primjeru je prikazan proračun neto pozitivne usisne visine.

Ž. Vuković, I. Halkijević

Subject review

Cavitation in centrifugal pumps

An overview of recent scientific studies of the phenomenon of cavitation in dry-type centrifugal pumps is given. The concept of available and required net positive suction height was adopted as basic parameter for description of the occurrence and development of cavitation. Perceptions that ensure cavitation-free operation of pumps are presented. Such cavitation-free operation would eliminate major problems encountered in practice during regular operation and maintenance. The calculation of the net positive suction height is presented on an example.

Ž. Vuković, I. Halkijević

Ouvrage de synthèse

Cavitation dans les pompes centrifuges

Un aperçu sur les études scientifiques récentes se concentrant sur le phénomène de cavitation dans les pompes centrifuges de type sec est présenté. La conception de hauteur d'aspiration nette positive, tant disponible que requise, a été retenue comme paramètre de base pour la description de l'apparition et du développement de la cavitation. Les perceptions permettant l'opération des pompes sans cavitation sont présentées. Cette opération sans cavitation éliminerait les problèmes importantes rencontrés dans la pratique au cours de la marche et l'entretien usuels. Le calcul de la hauteur d'aspiration nette positive est présenté sur un exemple.

Ж. Вукович, И. Халкиевич

Обзорная работа

Кавитация в центробежных насосах

Приведен обзор актуальных научных исследований явления кавитации в центробежных насосах сухого исполнения. В качестве основного параметра при описании процессов появления и развития кавитации использовалась концепция имеющейся и необходимой чистой позитивной высоты всасывания. Приведены сведения о средствах, обеспечивающих безкавитационную работу насоса, что предотвращает возможность появления на практике серьезных проблем при регулярной работе и техническом обслуживании. Приведен пример расчета чистой позитивной высоты всасывания.

Ž. Vuković, I. Halkijević

Übersichtsarbeit

Kavitation bei Zentrifugalpumpen

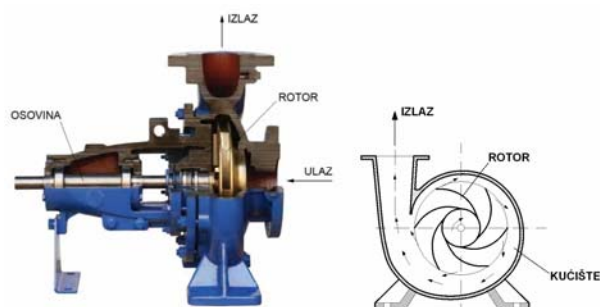
Ausgelegt ist ein Überblick der aktuellen wissenschaftlichen Forschungen des Problems der Kavitation bei Zentrifugalpumpen trockener Ausführung. Als Grundparameter bei der Beschreibung des Auftretis und der Entwicklung der Kavitation benützte man die Konzeption der verfügbaren Höhe und der erforderlichen netto positiven Soghöhe. Ausgelegt sind Erkenntnisse mit denen man eine kavitationslose Arbeit der Pumpen sichert, womit man die Möglichkeit des Auftretis bedeutender Probleme bei regelmässigem Betrieb und Wartung abwendet. Am Beispiel ist eine Berechnung der erforderlichen netto positiven Soghöhe dargestellt.

Autori: Prof. dr. sc. **Živko Vuković**, dipl. ing. građ.; **Ivan Halkijević**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

Centrifugalne su crpke u praksi najčešće upotrebljavani tip rotodinamičkih crpki koje rade na principu rotacijskog djelovanja [1].

Sastoje se od okretljivoga radnog kola s lopaticama (rotora ili impelera) ugrađenoga na okretljivoj pogonskoj osovini u nepokretno kućište (stator), (slika 1.).



Slika 1. Poprečni presjeci centrifugalne crpke [2]

Vrtnjom rotora razvija se centrifugalna sila zbog koje se u njegovu niskotlačnom području razvija usisno djelovanje tako da kapljevina (voda) ispunjava dijelove rotora između lopatica, njime se okreće, te pod djelovanjem radijalne i tangencijalne komponente brzine kapljavine protječe prema izlazu iz kućišta, odnosno prema području visokog tlaka (tlačnom cjevovodu) [3].

U građevinskoj je praksi primjena centrifugalnih crpki osobito raširena kod sustava javne vodoopskrbe i odvodnje te kod melioracijskih i hidroenergetskih sustava.

Pri tome se procjenjuje da su kod oko 80 % instaliranih centrifugalnih crpki prisutni različiti problemi od kojih su najzastupljeniji [4]:

- nepostizanje projektiranog kapaciteta
- oštećenje i osjetno kraći uporabni vijek crpnih agregata
- vibracije
- buka.

Ovi se problemi redovito pojavljuju kombinirano, a samo izuzetno rijetko pojedinačno, čije otklanjanje radi redovitog pogona i održavanja crpki iziskuje relativno visoke godišnje troškove.

Jednim od najčešćih uzroka navedenih problema, a time i troškova, smatra se pojava kavitacije.

Do kavitacije u centrifugalnim crpkama primarno dolazi zbog njihove nepravilne instalacije, odnosno pogrešnog projekta i izvedbe sustava: usisna cijev, crpka i početak tlačnog cjevovoda.

Stoga je cilj ovoga rada dati pregled aktualnih znanstvenih istraživanja kojima se opisuje fenomen kavitacije u centrifugalnim crpkama te ujedno iznose spoznaje čijom

se primjenom omogućuje uspostava beskavitacijskog režima rada crpki, a time i eliminacija prethodno navedenih problema.

2 Kavitacija

Ovisno o tlaku i temperaturi, tj. pri određenim termodinamičkim uvjetima ravnoteže kapljevite i plinovite faze, voda se isparuje tako da se iznad njezine površine formira karakterističan tlak para.

Ako u određenim uvjetima strujanja vode tlak padne na tlak para (tlak isparavanja) dolazi do lokalnog isparavanja, tj. do stvaranja mjehurića pare. Struja vode odnosi mjehuriće pare, koji kad dospiju u područje većeg tlaka uz prasak naglo kolabiraju (implodiraju). Time dolazi i do nagle promjene gustoće koja pak izaziva naglu i ekstremnu promjenu tlaka [1], [2], [5], [6].

Ova se pojava naziva kavitacijom.

Popratne su tlačne promjene toliko velike da razaraju i najčvršće podloge, tako da se na mjestima izbačenog materijala pojavljuju rupice – kaverne koje svojim oblikom dodatno deformiraju strujanje pa stvaraju još niže tlakove i proces je progresivan.

Ovu pojavu nazivamo kavitacijskom erozijom. Između ostaloga, ogleda se i u mehaničkom oštećenju hidrotehničke opreme, osobito crpki i turbina.

Tipično je da se javlja kavitacija u centrifugalnim crpkama neposredno uz napadni brid (rub) lopatica rotora (slika 2.), kada u njegovu usisnom području dođe do naglog pada tlaka ispod tlaka isparavanja, što za posljedicu ima stvaranje mjehurića pare koji potom vrtanjom rotora dolaze u područje visokog tlaka i naglo kolabiraju.

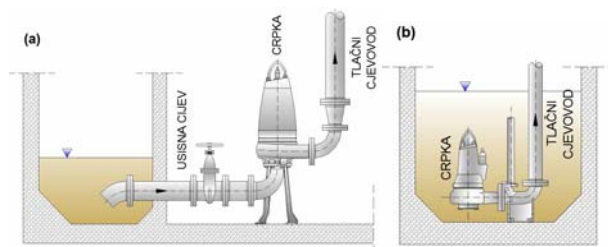


Slika 2. Tipična kavitacijska oštećenja rotora centrifugalnih crpki [7], [8]

Detaljnije objašnjenje fenomena kavitacije kod centrifugalnih crpki vrlo je zahtjevno, budući da je potrebna integralna analiza fizikalnih, kemijskih i termodinamičkih procesa u kratkom razdoblju ($T = 0,5 \cdot 10^{-4}$ do $2,0 \cdot 10^{-4}$ [s]), na vrlo maloj ploštini ($A = 10^{-3}$ do 10^{-4} [mm²]), pri visokom tlaku ($p = 10^3$ do 10^5 [bara]) i pri visokim frekvencijama ($f = 2500$ [Hz]) [2].

Uz samo oštećenje rotora crpke, kavitacija, između ostaloga, dovodi do smanjenja kapaciteta crpke ($Q - H$ krivulje) i djelotvornosti (efikasnosti), η .

S obzirom na mogućnost suhe i mokre ugradnje crpki (slika 3.), fenomen kavitacije pojavljuje se u crpkama instaliranih u suhom, dakle za slučaj kada voda iz crpnog spremnika dolazi u crpku posredstvom usisne cijevi. U crpkama mokre izvedbe nema usisne cijevi jer je crpka ugrađena u crpnom spremniku. Zbog toga se kod ovog tipa crpki ne pojavljuje kavitacija, sve dok se radna točka crpnog sustava nalazi na dopuštenom dijelu $Q - H$ krivulje [9].



Slika 3. Crpke prema položaju elektromotora: (a) u suhom, (b) u mokrom

Stoga svaku centrifugalnu crpku suhe izvedbe treba provjeriti na mogućnost pojave i razvoja kavitacije, odnosno kavitacijske erozije.

Uvjet da kod crpke ne dođe do kavitacije dan je izrazom:

$$p_{aps,min} > p_v \quad (1)$$

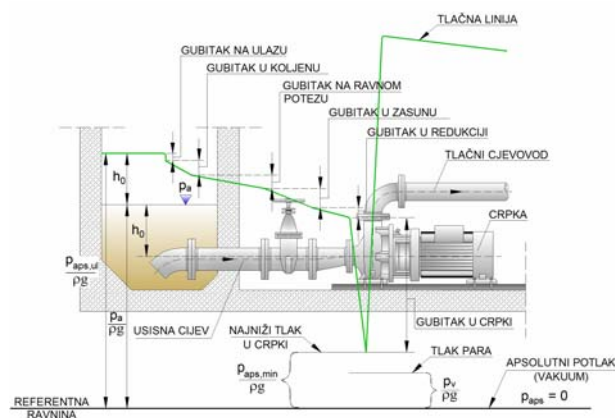
gdje su:

$p_{aps,min}$ - najmanji apsolutni tlak u crpki, [Pa]

p_v - tlak (vodenih) para pri određenoj temperaturi, [Pa].

Pri temperaturi vode do 100 °C, tlak para je manji od normalnog atmosferskog tlaka, p_a [Pa]. Stoga, pošto se kod fenomena kavitacije promatra i režim potlaka, analize je potrebno provoditi s apsolutnim vrijednostima tlakova.

Na slici 4. prikazan je tipičan slučaj distribucije tlaka u usisnoj cijevi, crpki i početku tlačnog cjevovoda u crpki instaliranoj u suhom.



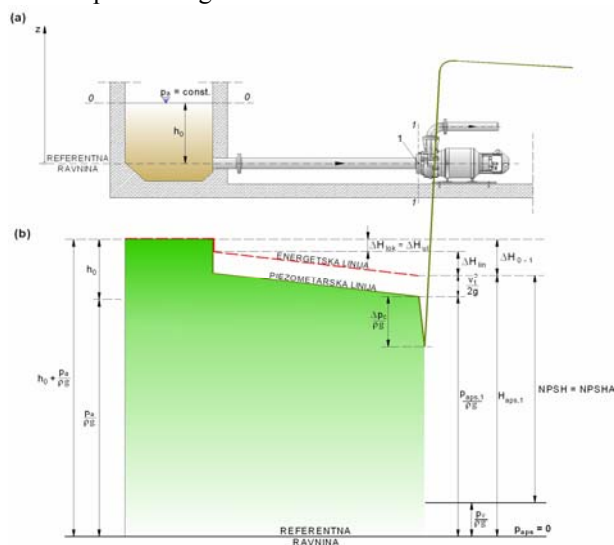
Slika 4. Promjena tlaka u usisnoj cijevi, crpki i početku tlačnog cjevovoda u crpki suhe izvedbe [10]

Sa slike uočavamo da se, prema uvjetu danom izrazom (1), kavitacija neće pojaviti sve dok se minimalna vrijednost apsolutnog tlaka u crpki ne spusti do vrijednosti tlaka vodenih para.

3 Neto pozitivna usisna visina

Za daljnje analize pojave i razvoja kavitacije potrebno je koristiti se konceptom tzv. neto pozitivne usisne visine, NPSH (engl. *Net Positive Suction Head*).

U tom cilju promatrajmo shemu usisnog dijela crpnog sustava prikazanog na slici 5.a.



Slika 5. Komponente neto pozitivne usisne visine, NPSH, s razinom vode iznad osi crpke: (a) shema usisnog dijela crpnog sustava, (b) promjena tlaka i komponente NPSH

Usisna cijev crpke spojena je s otvorenim crpnim spremnikom na čijoj slobodnoj vodnoj površini vlada konstantan atmosferski tlak, p_a [Pa]. Razina vode u crpnom spremniku nalazi se na konstantnoj visini, h_0 [m], iznad referentne ravnine koja se nalazi na istoj razini kao i os ulaza u crpku.

Bernoullijevom jednadžbom za realnu tekućinu za karakteristične presjeke 0 - 0 (na slobodnoj vodnoj površini u crpnom spremniku) i 1 - 1 (na ulaznoj, tj. usisnoj prirubnici crpke), izraženo u visinskom obliku dobijemo:

$$z_0 + \frac{p_{aps,0}}{\rho g} + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_{aps,1}}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \Delta H_{0-1} \quad (2)$$

gdje su:

z_0 - visina položaja promatranih točaka presjeka 0 - 0, [m]

$p_{aps,0}$ - apsolutni tlak u promatranim točkama presjeka 0 - 0, [Pa]

z_1 - visina položaja promatrane točke 1 u presjeku 1 - 1, odabrane na osi horizontalne pogonske osovine rotora na ulaznoj (usisnoj) prirubnici crpke, [m]

- ρ - gustoća vode, [kg/m³]
 α_0, α_1 - Coriolisovi koeficijenti u promatranim točkama presjeka 0 - 0 i 1 - 1, [1]
 $p_{aps,1}$ - apsolutni tlak u promatranjoj točki 1, [Pa]
 v_0 - brzina vode u presjeku 0 - 0, [m/s]
 v_1 - brzina vode u presjeku 1 - 1, odnosno na ulazu u crpku, [m/s]
 ΔH_{0-1} - hidraulički gubici (lokalni + linijski) u usisnoj cijevi, tj. na potezu od presjeka 0 - 0 do presjeka 1 - 1, [m].

Uz supstituciju $z_0 = h_0$, $p_{aps,0} = p_a$, $\alpha_0 = \alpha_1 = 1.0$, $v_0 = 0$ i $z_1 = 0$, ovaj izraz prelazi u oblik:

$$h_0 + \frac{p_a}{\rho g} = \frac{p_{aps,1}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + \Delta H_{0-1} \quad (3)$$

što je u grafičkom obliku prikazano na slici 5.b.

Pri tome je, sukladno preporukama *Europskog udruženja proizvođača crpki* (engl. *European Association of Pump Manufacturers*) neto pozitivna usisna visina, *NPSH*, definirana kao [11]:

$$NPSH = \frac{p_{aps,1}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_v}{\rho g} \quad (4a)$$

što uz supstituciju:

$$H_{aps,1} = \frac{p_{aps,1}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \quad (4b)$$

možemo pisati u obliku:

$$NPSH = H_{aps,1} - \frac{p_v}{\rho g} \quad (4c)$$

gdje je $H_{aps,1}$ [m] apsolutna vrijednost ukupne energijske visine u točki 1.

Fizikalna interpretacija *NPSH* zornija je uz pomoć pojma specifične mehaničke energije (mehaničke energije jedinične mase) vode, tako da je izraz (4c) potrebno pomnožiti s ubrzanjem polja gravitacije, g :

$$(NPSH)g = H_{aps,1}g - \frac{p_v}{\rho} \quad (4d)$$

Dakle, prema izrazu (4d) *NPSH* reprezentira specifičnu mehaničku energiju vode iznad tlaka vodenih para na ulazu u crpku, a što je izrazima (4a) - (4c) dano u visinskom obliku, tj. u metrima vodnog stupca.

Veličina *NPSH* dana izrazom (4a) prema definiciji naziva se raspoloživom (engl. *Available*) *NPSH* i označava *NPSHA*.

Ovu veličinu proračunom određuje projektant na temelju odabranih parametara usisnog dijela crpnog sustava.

Naime, prema slici 5.b možemo pisati:

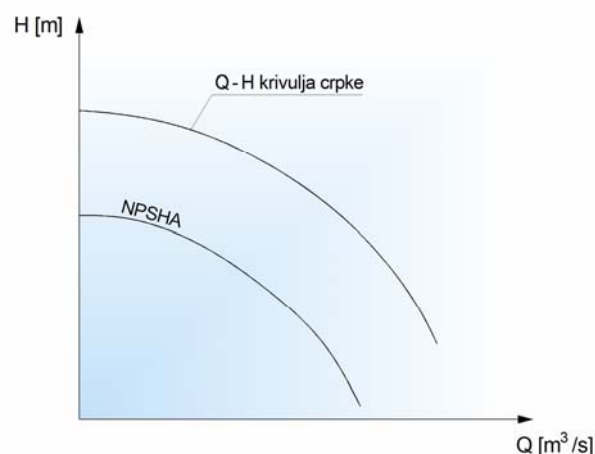
$$h_0 + \frac{p_a}{\rho g} = \Delta H_{0-1} + NPSHA + \frac{p_v}{\rho g} \quad (5a)$$

odnosno:

$$NPSHA = h_0 + \frac{p_a - p_v}{\rho g} - \Delta H_{0-1} \quad (5b)$$

Uz pretpostavku konstantnosti prva dva člana s desne strane izraza (5b) zaključujemo kako vrijednost *NPSHA* opada s povećanjem protoka, odnosno brzine, budući da hidraulički gubici rastu u funkciji kvadrata brzine.

Tipična je varijacija *NPSHA* u funkciji protoka crpkom, Q [m³/s], prikazana na slici 6., gdje je H [m] visina dizanja.



Slika 6. Tipična *NPSHA* krivulja na Q - H dijagramu crpke [2], [9]

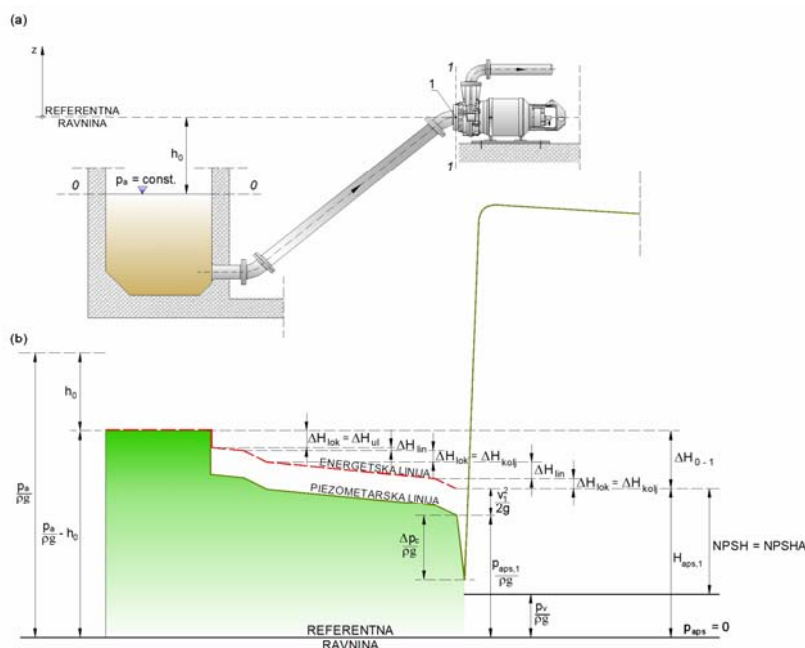
U slučaju kada se razina vode u crpnom spremniku nalazi na konstantnoj visini, h_0 , ispod osi crpke, odnosno ispod referentne ravnine (slika 7.) izraz (5b) poprima oblik:

$$NPSHA = -h_0 + \frac{p_a - p_v}{\rho g} - \Delta H_{0-1} \quad (5c)$$

Predznak minus ispred člana h_0 posljedica je pozitivne orijentacije osi z vertikalno uvis, a h_0 se u ovome slučaju odmjerava od referentne ravnine prema dolje.

Izrazi (5b) i (5c) zadovoljavaju slučaj i kada je $h_0 = 0$, tj. kada se referentna ravnina, odnosno os crpke, poklapa s razinom vode, tako da imamo:

$$NPSHA = \frac{p_a - p_v}{\rho g} - \Delta H_{0-1} \quad (5d)$$



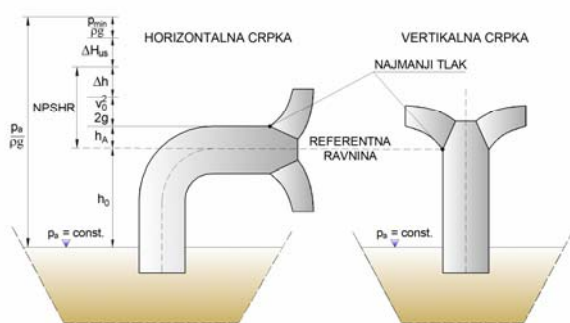
Slika 7. Komponente neto pozitivne usisne visine, $NPSH$, s razinom vode ispod osi crpke
(a) shema usisnog dijela crpnog sustava, (b) promjena tlaka i komponente $NPSH$

Prethodne analize $NPSH$ provedene su pod pretpostavkom da na površini crpnog spremnika vlada normalni atmosferski tlak, p_a . U slučaju da je vrijednost tlaka na vodnoj površini crpnog spremnika, p_{cs} , različita od normalnog atmosferskog tlaka, tj. $p_{cs} \neq p_a$, tada u izrazu (3) - (5) treba unijeti pripadajuću vrijednost tlaka $p_{cs} \geq 0$.

Iz iznesenoga možemo zaključiti kako se za beskavitacijski režim rada crpke mora osigurati da minimalna vrijednost apsolutnog tlaka u crpki bude iznad tlaka isparavanja za određenu temperaturu vode. To praktički znači da se, između ostaloga, uzimajući u obzir i pad tlaka u crpki, Δp_c [Pa], u crpnom sustavu mora osigurati najmanja vrijednost apsolutnog tlaka većeg od tlaka para.

Ovaj se zahtjev osigurava uvođenjem koncepta potrebne (engl. *Required*) $NPSH$ i označava sa $NPSHR$.

Definiran je [9] izrazom (slika 8.):



Slika 8. Komponente potrebne neto pozitivne usisne visine, $NPSHR$ [9]

$$NPSHR = h_A + \frac{v_0^2}{2g} + \Delta h \quad (6)$$

gdje su:

h_A - visinska razlika između referentne ravnine i vrha napadnog brida lopatice rotora, [m]

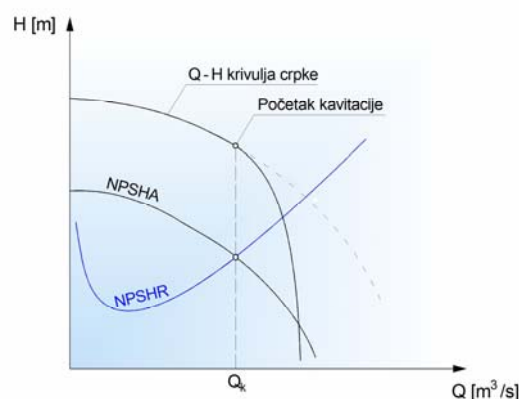
v_0 - ulazna brzina na rotoru, [m/s]

Δh - lokalni pad tlačne visine na napadnom bridu lopatice rotora, [m].

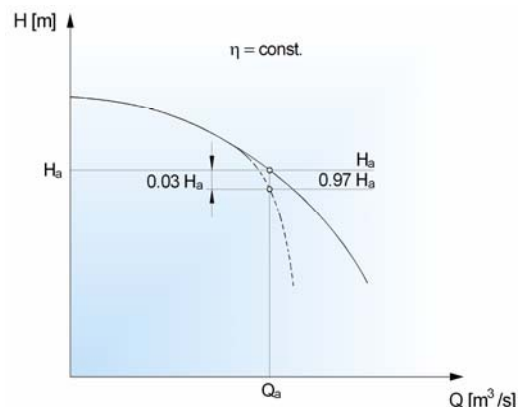
Ovu veličinu određuju proizvođači crpki kao numeričku vrijednost ili kao krivulju (slika 9.)

Sa slike zaključujemo da sve dok je $NPSHA$ veće od $NPSHR$, odnosno protok crpkom manji od Q_k , crpka radi u beskavitacijskom režimu.

$NPSHR$ ovisi o više faktora od kojih su najutjecajniji tip i oblik ulaza rotora, kapacitet crpke, brzina rotacije rotora i vrsta kapljevine koja se crpi [12].

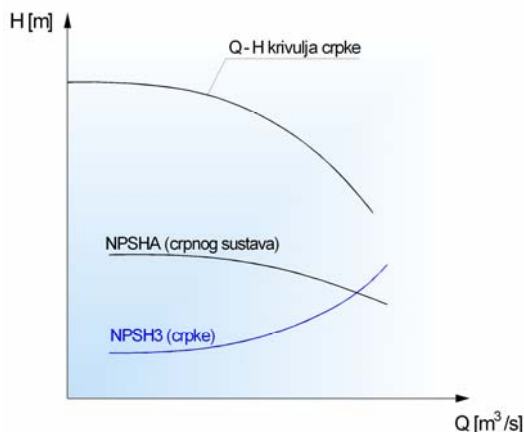


Slika 9. Tipičan odnos $NPSHA$ i $NPSHR$ krivulja na $Q - H$ dijagramu crpke [2], [9]



Slika 10. Praktično određivanje $NPSHR$ [11]

Proizvođači crpki dogovorno definiraju kriterij za određivanje $NPSHR$. Ovaj kriterij odgovara stupnju kavitacije kod kojega, pri konstantnoj brzini i protoku, Q_a [m^3/s], dolazi do 3 %-tnog smanjenja visine dizanja (slika 10.).



Slika 11. Tipične $NPSHA$ i $NPSH3$ krivulje na $Q - H$ dijagramu crpke [11]

$NPSHR$ određen prema tome kriteriju označava se sa $NPSH3$ (slika 11.).

4 Beskavitacijski rad crpki

Radi osiguranja beskavitacijskog rada crpke (slika 9.) mora biti ispunjen uvjet:

$$NPSHA > NPSHR \quad (7a)$$

odnosno:

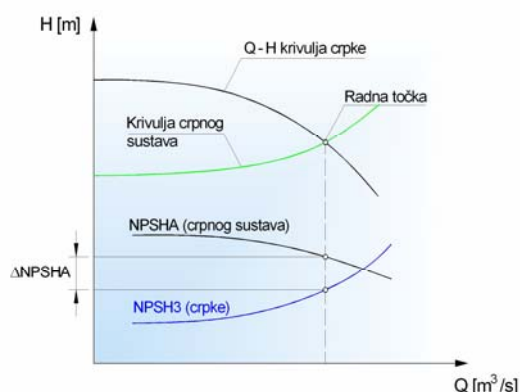
$$NPSHA > NPSH3 \quad (7b)$$

Ovi se izrazi češće izražavaju u obliku:

$$NPSHA = NPSHR + \Delta NPSHA \quad (8a)$$

odnosno:

$$NPSHA = NPSH3 + \Delta NPSHA \quad (8b)$$



Slika 12. Sigurnosna veličina, $\Delta NPSHA$ [12]

Sigurnosna veličina $\Delta NPSHA$ (slika 12.) preporučuje se [11] uzeti najmanje 0,5 [m]. Međutim, s obzirom na razinu točnosti ulaznih podataka pri proračunu raspoložive

ve neto pozitivne usisne visine, $NPSHA$, smatra se primjerenijim [13], [14] za sigurnosnu veličinu, $\Delta NPSHA$, uzeti minimalno 1,0 – 1,5 [m].

U literaturi se [9] podaci za najmanji $\Delta NPSHA$ daju s obzirom na položaj osi crpke:

- za horizontalne crpke, $\Delta NPSHA = 1,0 - 1,5$ [m]
- za vertikalne crpke, $\Delta NPSHA = 2,0 - 2,5$ [m].

Dakle, za sprječavanje pojave i razvoja kavitacije, odnosno osiguranja beskavitacijskog režima rada centrifugalnih crpki definiranog izrazom (7), potrebno je povećati $NPSHA$ iznad $NPSHR$. To je moguće postići [12], [15]:

- (a) povećanjem raspoložive neto pozitivne usisne visine, $NPSHA$
- (b) smanjenjem potrebne neto pozitivne usisne visine, $NPSHR$.

Povećanje $NPSHA$ se sukladno izrazima (5a) - (5c), uz pretpostavku konstantnosti gravitacijskog ubrzanja, g , i gustoće vode, ρ , može postići:

- povećanjem tlaka na ulazu (usisu) crpke, npr. povišenjem razine vode u crpnom spremniku ili povećanjem tlaka u (zatvorenom, tj. tlačnom) crpnom spremniku
- sniženjem temperature vode koja se crpi, budući da sniženjem temperature vode pada i tlak para
- smanjenjem hidrauličkih gubitaka u usisnoj cijevi, npr. povećanjem promjera cijevi, smanjenjem njezine duljine te reduciranjem broja oblikovnih komada i armatura na cijevi.

Smanjenje $NPSHR$ prema izrazu (6) može se postignuti:

- smanjenjem ulazne brzine vode na rotoru crpke, tj. smanjenjem protoka kroz crpku, Q
- smanjenjem brzine (broja okretaja) crpke.

Kombinacijom nabrojanih parametara povećanja $NPSHA$ i smanjenja $NPSHR$ svakim se projektom crpnog sustava treba osigurati beskavitacijski rad crpki.

Time se ujedno otklanja i mogućnost pojavljivanja u uvodnom dijelu navedenih problema pri radu centrifugalnih crpki.

5 Numerički primjer

U tablici 1. su za ilustraciju prikazani rezultati proračuna $NPSHA$ za ulazne podatke iz prvih sedam stupaca tablice.

Pretpostavljajući konstantnost parametara iz prvih triju stupaca tablice, rezultati proračuna ukazuju na dvije činjenice obrazložene u prethodnoj točki:

- (a) $NPSHA$ opada povišenjem temperature vode
- (b) $NPSHA$ opada sniženjem razine vode iznad osi crpke.

Tablica 1. Rezultati proračuna *NPSHA*

Atmosferski tlak p_a [Pa]	Gravitacijsko ubrzanje g [m/s ²]	Hidraulički gubici ΔH_{0-1} [m]	Razina vode iznad osi crpke h_0 [m]	Temperatura vode T [°C]	Gustoća vode ρ [kg/m ³]	Tlak para p_v [Pa]	<i>NPSHA</i> [m]
01	02	03	04	05	06	07	08
10 ⁵	9,81	1,0	3,0	10	999,7	1,2 · 10 ³	12,1
				30	995,7	4,3 · 10 ³	11,8
			0,0	10	999,7	1,2 · 10 ³	9,1
				30	995,7	4,3 · 10 ³	8,8
			- 3,0	10	999,7	1,2 · 10 ³	6,1
				30	995,7	4,3 · 10 ³	5,8

6 Zaključak

Pojava kavitacije i kavitacijske erozije kod centrifugalnih crpki suhe izvedbe uzrokuje nepostizanje projektiranog kapaciteta crpnog sustava, oštećenje crpki, smanjenje uporabnog vijeka crpnih agregata te pojavu vibracija i buke.

Za beskavitacijski režim rada crpki potrebno je osigurati da najmanja vrijednost apsolutnog tlaka u crpki bude iznad tlaka isparavanja za određenu temperaturu vode. To znači da se u crpnom sustavu, uzimajući u obzir pad tlaka u usisnoj cijevi i crpki, mora osigurati minimalna vrijednost tlaka većeg od tlaka para.

Kao osnovni parametar opisa fenomena kavitacije odabrana je neto pozitivna usisna visina koja se raščlanjuje na raspoloživu i potrebnu.

Raspoloživu neto pozitivnu usisnu visinu proračunom definira projektant na temelju odabranih parametara usisnog dijela crpnog sustava, dok potrebnu neto pozitivnu usisnu visinu određuju proizvođači crpki.

Za sprječavanje kavitacije, odnosno osiguranja beskavitacijskog rada crpki treba biti ispunjen uvjet da je raspo-

loživa neto pozitivna usisna visina veća od potrebne. To je moguće postignuti povećanjem raspoložive neto pozitivne usisne visine i/ili smanjenjem potrebne neto pozitivne usisne visine.

Povećanje raspoložive neto pozitivne usisne visine moguće je:

- povećanjem tlaka na ulazu (usisu) crpke
- sniženjem temperature vode koja se crpi

Smanjenje potrebne neto pozitivne usisne visine može se postignuti:

- smanjenjem protoka u crpki
- smanjenjem brzine rada crpke.

Kombinacijom ovih parametara kod svakog je projekta crpnog sustava moguće osigurati beskavitacijski režim rada crpki, a time i eliminiranje značajnih problema pri njihovom redovitom pogonu i održavanju.

LITERATURA

- [1] Johnson, M.; Ratnayaka, D. D.; Brandt, M. J.: *Twort's Water Supply*, 6th edn, Butterworth - Heinemann, Burlington - Oxford, 2009.
- [2] Neumaier, R.: *Hermetic Pumps*, Verlag und Bildarchiv, Sulzbach, 1994.
- [3] Gulić, I.: *Opskrba vodom*, HSGI, Zagreb, 2000.
- [4] Paugh, J. J.: *How to Compute Net Positive Suction Head for Centrifugal Pumps*, Warren Pumps, Richmond, 2001.
- [5] Mackay, R.: *The Practical Pumping Handbook*, Elsevier, Oxford - New York - Tokyo, 2004.
- [6] Jović, V.: *Osnove hidromehanike*, Element, Zagreb, 2006.
- [7] Björk, J.; Erickson, B.: *Centrifugal Pumps*, Flowserve Corp., Irving, 2005.
- [8] Arndt, R. E. A.: *Cavitation in Depth*, St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, 2001.
- [9] Grundfos: *The Sewage Pumping Handbook*, Grundfos DK A/S, Bjerringbro, 2007.
- [10] Grundfos: *Wastewater Pumps*, 3rd edn, Grundfos DK A/S, Bjerringbro, 2002.
- [11] European Association of Pump Manufacturers: *NPSH for Rotodynamic Pumps: A Reference Guide*, Elsevier, Oxford - New York - Tokyo, 1999.
- [12] Engineers Edge: *Preventing Cavitation in Centrifugal Pump*, 2010, www.engineersedge.com
- [13] Bachus, L.; Custodio, A.: *Know and Understand Centrifugal Pumps*, Elsevier, Oxford - New York - Tokyo, 2003.
- [14] Jones, G. M. (edit): *Pumping Station Design*, 3rd edn, Butterworth - Heinemann, Burlington - Oxford, 2008.
- [15] Schiavello, B.; Visser, F. C.: *Pump Cavitation - Various NPSHR Criteria, NPSHA Margins and Impeller Life Expectancy*, Proceedings of the 25th International Pump Users Symposium, Houston, 2009, pp. 113 - 144.